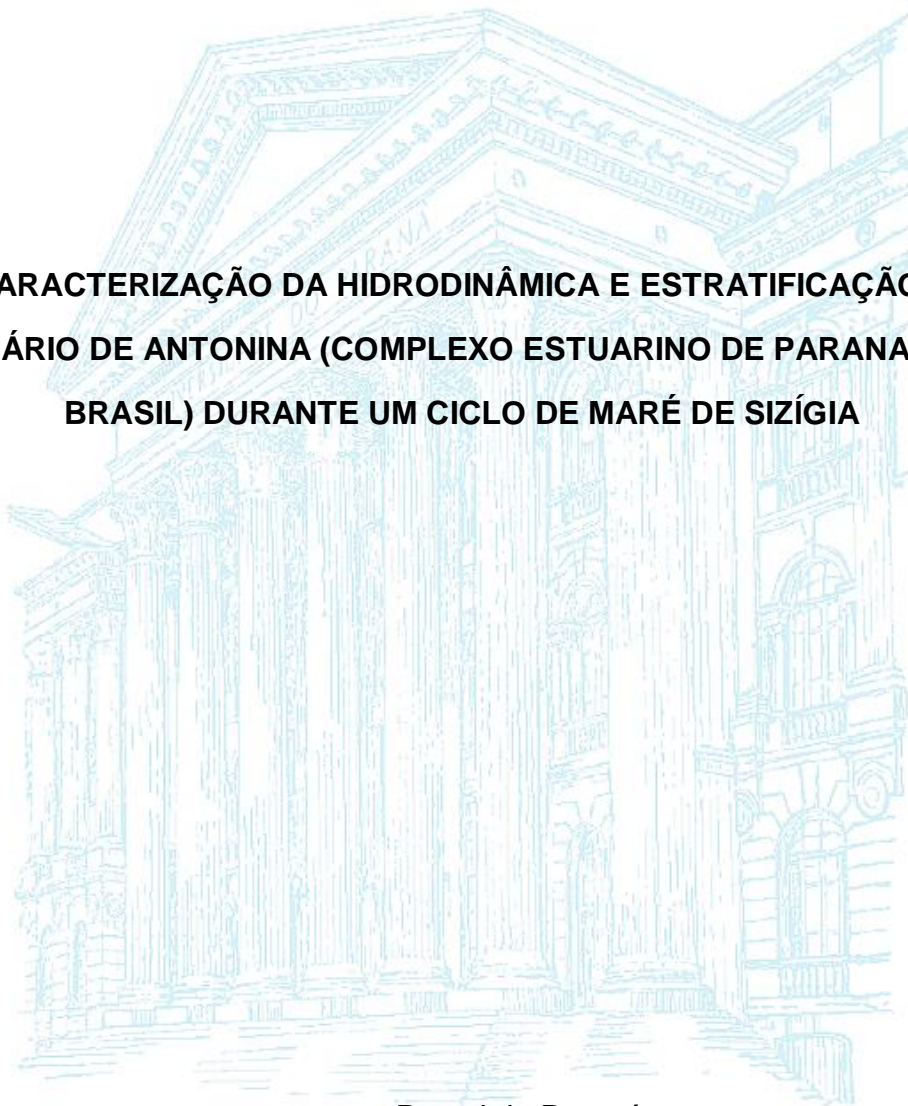


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
CENTRO DE ESTUDOS DO MAR  
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

VITOR EDUARDO MELENIS

**CARACTERIZAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E ESTRATIFICAÇÃO DO SUB-  
ESTUÁRIO DE ANTONINA (COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ –  
BRASIL) DURANTE UM CICLO DE MARÉ DE SIZÍGIA**



Pontal do Paraná

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA  
CENTRO DE ESTUDOS DO MAR  
GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

VITOR EDUARDO MELENIS

**CARACTERIZAÇÃO DA HIDRODINÂMICA E ESTRATIFICAÇÃO DO SUB-  
ESTUÁRIO DE ANTONINA (COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ –  
BRASIL) DURANTE UM CICLO DE MARÉ DE SIZÍGIA**

Monografia apresentada como requisito  
parcial à obtenção do título de Bacharel em  
Oceanografia, com habilitação em Pesquisa  
Oceanográfica, Setor de Ciências da Terra, Centro  
de estudos do Mar, Universidade Federal do  
Paraná

Orientador: Eduardo Marone

Coorientadora: Helenita Catharina Dalla-Lana Forcelini

Pontal do Paraná

2015

## RESUMO

Este trabalho apresenta a caracterização da dinâmica hídrica do sub estuário de Antonina durante um ciclo de maré de sizígia. Para tanto, foram medidos os campos de velocidade e termohalinos ao longo do tempo e do espaço a fim de classificar o sub estuário através do Diagrama de HANSEY e RATRAY. As campanhas de coleta de dados foram realizadas nos dias 02 e 03 de junho de 2015 no sub estuário de Antonina, durante um período de 13 horas para cada dia, intervalo correspondente a um ciclo completo de maré de sizígia (lua cheia). Para o monitoramento dos parâmetros hidrográficos e correntográficos na desembocadura do sub estuário de Antonina, utilizou-se um CTD, um ADCP e um marégrafo. Salinidades mais baixas ocorreram no estofo da vazante e as mais altas no estofo da enchente. Quanto mais distante do transecto localizado no estreitamento do canal, tanto a montante quanto a jusante, a coluna d'água tende a ficar homogênea, ou seja, quanto mais próximo do transecto, mais estratificada é a coluna d'água. Para o parâmetro temperatura, a coluna d'água se manteve mais homogênea, com variações horizontais maiores que verticais. Apesar de não ser observada a estratificação da temperatura na coluna d'água, ela aumentou ao longo da enchente e em direção à montante do estuário. O sub-estuário de Antonina foi classificado como parcialmente estratificado, ou seja, a estratificação de salinidade é moderada e a diferença entre as salinidades do fundo e da superfície é de poucas unidades.

**Palavras-chave:** Hidrodinâmica estuarina. Antonina. Salinidade. Temperatura. Densidade

## **ABSTRACT**

This work presents the characterization of water dynamics in Antonina estuary during a spring tide cycle. To this end, measured the speed and thermohalines over time and space in order to classify the estuary through the HANSEY and RATRAY diagram. Data collection campaigns were held on June 02 and 03 of 2015 and in the estuary of Antonina, during a period of 13 hours for each day, interval corresponding to a complete cycle of spring tide (full moon). For the monitoring of hydrographic parameters and currents measures in the outfall of the estuary of Antonina, a CTD, an ADCP and a tide gauge were used. Lower salinities occurred in the padding of the ebb and the highest in the padding of the flood. Farther than the transect located in the narrowing of the canal, both upstream as downstream, the water column tends to be homogeneous, i.e., the closer of the transect, more homogeneous is the water column. For the temperature, the water column remained more homogeneous, with horizontal variations greater than vertical. Although not observed the temperature stratification in the water column, it has increased along the flood towards the upstream of the estuary. This result coincides with OFFICER classification, resulting in the estuary of Antonina would be partially stratified, that is, the stratification of salinity is moderate and the difference between the salinities of the bottom and the surface is of few units.

Key-words: Estuarine hidrodynamic. Antonina. Salinity. Temperature. Density.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MAPA DA ÁREA DE ESTUDO INDICANDO OS PONTOS DE COLETA COM CTD E A LOCALIZAÇÃO DOS TRANSECTOS REALIZADOS COM ADCP -----12

FIGURA 2. DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE PARANAGUÁ - INMET.-----  
17

FIGURA 1. VARIAÇÃO DA ALTURA DE MARÉ MEDIDAS PELO CTD SEABIRD (S) E PELO MARÉGRAFO DO FÉLIX (F), NOS DIAS 02/06/15 (A) E 03/06/15 (B). -----  
18

FIGURA 4. VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA SALINIDADE, DENSIDADE E TEMPERATURA NO DIA 02/06/15 -----  
--20

FIGURA 5. VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA SALINIDADE, DENSIDADE E TEMPERATURA NO DIA 03/06/15 -----  
--20

FIGURA 6. VELOCIDADE LONGITUDINAL DA CORRENTE AO LONGO DO TEMPO NO DIA 02/06/2015.----- 21

FIGURA 7. VELOCIDADE LONGITUDINAL DA CORRENTE AO LONGO DO TEMPO NO DIA 03/06/2015.----- 22

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	6
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	9
2.1	Área de estudo.....	9
2.2	Procedimentos Amostrais.....	13
2.3	ANÁLISE dos dados.....	15
3	RESULTADOS.....	17
3.1	Dados INMET.....	18
3.2	Variação da Maré.....	18
3.3	Distribuição vertical da salinidade, densidade e temperatura.....	19
4	DISCUSSÃO.....	24
5	CONCLUSÃO.....	25
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
7	ANEXOS.....	28

## 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento da hidrodinâmica dos estuários é necessário para entender os processos que afetam a distribuição e os fluxos de massa, dos materiais particulados, poluentes, nutrientes e dos organismos, especialmente dos planctônicos. Contudo, a compreensão da dinâmica estuarina é complexa porque, além das interações físicas, químicas, biológicas e geológicas que ocorrem no interior de suas águas, estes sistemas são extremamente vulneráveis às variações ambientais, ocorrendo estas em diferentes escalas e intervalos de tempo (KJERFVE & WOLAVER, 1988).

Variações espaço-temporais da hidrodinâmica estuarina incluem desde flutuações da quantidade de água que escoam da bacia de drenagem, quanto de sistemas meteorológicos e oceanográficos atuando no oceano adjacente. Desta forma, as principais forças motrizes que condicionam a hidrodinâmica dos estuários são, i) a descarga de água doce proveniente da drenagem continental, ii) a co-oscilação da maré, e iii) a ação dos ventos na superfície do sistema. Cada uma das três forças induz um tipo particular de circulação, sendo estas, i) circulação gravitacional, ii) circulação residual, e iii) correntes induzidas pelos ventos.

Embora aconteça a dominância de uma destas forças nos estuários, dois ou três tipos podem existir simultaneamente, o que resulta em uma complexa estrutura de fluxo (KJERFVE, 1990). A circulação resultante nos estuários está associada basicamente com a manutenção e a distribuição da salinidade no sistema. A diferença entre a salinidade da cabeceira e da desembocadura gera a força de gradiente de pressão, que pode ser decomposta em duas componentes: i) barotrópica, que depende da inclinação da superfície livre do sistema e é forçada pela co-oscilação da maré; e ii) baroclínica que está relacionada com o gradiente longitudinal da salinidade, sendo que sua intensidade aumenta em módulo com a

profundidade (HANSEN & RATRAY, 1965). Essa diferença de densidade entre a água doce e a salgada tende a manter a estratificação do sistema, enquanto o vento e a co-oscilação da maré agem para homogeneizar a coluna de água através de processos de difusão turbulenta (KJERFVE, 1990).

A classificação clássica de estuários fundamenta-se no diagrama de estratificação-circulação, desenvolvida por Hansen & Ratray (HANSEN & RATRAY, 1966; IBÁÑEZ ET AL., 1997). Baseia-se em dois parâmetros adimensionais cujo cálculo requer medições de velocidade e salinidade. O parâmetro de estratificação representa a razão entre o diferencial de salinidade entre a superfície e o fundo e a salinidade média na mesma seção. O parâmetro de circulação exprime a razão entre a corrente na superfície e a corrente média na seção. Este parâmetro de circulação representa a razão entre a intrusão média de água doce mais a água misturada por difusão turbulenta e a intrusão fluvial. Cada zona no diagrama de HANSEN & RATRAY corresponde a um conjunto de pontos característicos de cada situação hidrológica, já que a salinidade e a velocidade de corrente variam ao longo do estuário e do tempo.

Conforme o diagrama Estratificação-circulação proposto por HANSEN & RATRAY (1966), os vários tipos de estuários que podem ser classificados de acordo com esse diagrama são os seguintes:

- Tipo 1: o fluxo resultante é estuário abaixo em todas as profundidades e o transporte de sal é devido somente ao processo de difusão turbulenta (estuário bem misturado).
- Tipo 2: o fluxo resultante reverte com a profundidade e os processos advectivos e de difusão turbulenta são importantes para o transporte de sal estuário acima (estuário parcialmente misturado).
- Tipo 3: o transporte de sal estuário acima ocorre quase que exclusivamente pelo processo advectivo (e é característico dos fiordes).



- Tipo 4: estuários classificados de acordo com a estratificação de salinidade como cunha salina.

Uma sub-divisão do diagrama, levando em conta a estratificação vertical da coluna de água, classifica os tipos descritos acima em: (a) fracamente estratificados e (b) altamente estratificados.

O estudo da hidrodinâmica estuarina possibilita a identificação dos padrões de circulação, incluindo fluxos residuais, estratificação na coluna de água, processos de renovação das águas no seu interior, fenômenos de transporte e processos de mistura, auxiliando na compreensão de diversos processos ecológicos. Apesar da importância dos processos hidrodinâmicos para o entendimento do funcionamento do estuário, os estudos realizados no Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), Paraná, Brasil (25° 30' S/ 48° 30' W) não tem focado nos seus sub-estuários, em particular na Baía de Antonina.

A circulação no CEP é dominada principalmente pelas correntes de maré que acompanham o canal navegável, com predominância das correntes de vazante sobre as de enchente (NOERNBERG et al, 2004). A troca de água e material entre o sistema e mar aberto é regulada principalmente pelo regime de marés, sendo substancialmente diferente entre as marés de sizígia e quadratura (MARONE et al, 2005). De acordo com MARONE E JAMIYANAA (1995), o sistema estuarino do CEP exibe um padrão de estratificação salina somente em situações de fortes marés vazantes, principalmente durante a ocorrência de chuvas intensas. Nos demais períodos observa-se uma variação espacial no padrão de estratificação, com águas bem misturadas no setor externo e uma progressiva estratificação em direção ao interior da baía. Estas informações mostram que a hidrodinâmica da baía é fortemente influenciada pelos fatores climáticos como o regime de chuvas, descarga fluvial e ventos.

O CEP é apontado como um dos sistemas mais produtivos do mundo (MANN, 1982) e abriga um complexo de Unidades de Conservação estaduais e

federais. Além de sua relevância ecológica, o CEP destaca-se ainda pelo desenvolvimento econômico e social do Estado do Paraná, devido às atividades portuárias dos Portos de Paranaguá e de Antonina, atividade pesqueira e atividade turística. Estas atividades ocasionam um intenso tráfego de navios de grande porte e de pequenas e médias embarcações, resultando em um risco recorrentes de contaminação da água das baías.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar a dinâmica hídrica do sub-estuário de Antonina durante um ciclo de maré de sizígia. Mais especificamente, pretende-se estudar as variabilidades espaciais e temporais da estrutura termo-halina e da circulação em um perfil vertical ao longo de uma seção transversal ao canal principal, a fim de classificar o sub-estuário de acordo com o parâmetro de estratificação do diagrama de HANSEY E RATRAY. Para acessar o parâmetro de estratificação foram, i) verificada a estratificação vertical da salinidade ao longo do eixo longitudinal do canal, e ii) verificada a velocidade das correntes de fundo.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

A Planície Costeira do Estado do Paraná estende-se desde o sopé da Serra do Mar até o Oceano Atlântico, tem um comprimento de aproximadamente 90 km e uma largura máxima em torno de 55 km na região de Paranaguá. A planície está profundamente recortada pelo Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) – formado pelas baías de Antonina, Paranaguá, Laranjeiras e Pinheiros (LANA et al, 2001).

A Serra do Mar atua como uma barreira natural aos ventos regulares do oceano que provém de sudeste. Estes ventos carregam bastante umidade, que por sua vez se condensa na vertente da serra, ocasionando chuvas orográficas nas encostas a leste dela, onde são registrados os maiores índices de pluviosidade do estado do Paraná, com taxas anuais de precipitação superando 2000 mm (MANTOVANELLI, 1999). Contudo, taxas pluviométricas anuais observadas na vertente leste da Serra do Mar superam os 3500 mm, sendo considerada uma das mais expressivas do país. Os índices pluviométricos são fortemente condicionados às variações sazonais nesta região, sendo que durante o período de verão ocorrem cerca de 40 % do total anual pluviométrico (PAULA & CUNICO, 2007). A região está sob influência de ventos provenientes dos quadrantes leste e sudeste, com velocidade média de  $4,0 \text{ m.s}^{-1}$  (Brandini, 2000) e a umidade relativa média do ar é de 85% (LANA et al, 2001).

O Complexo Estuarino de Paranaguá tem área superficial de  $612 \text{ km}^2$ , e é composto por dois corpos de água principais: as Baías de Paranaguá e Antonina ( $260 \text{ km}^2$ ), no eixo leste-oeste, e as Baías de Laranjeiras e Pinheiros ( $200 \text{ km}^2$ ), no eixo norte-sul (LANA et al, 2001). O CEP se conecta com o oceano através dos canais da Galheta, Norte e Superagui (MANTOVANELLI et al, 2004), sendo a área ao redor da Ilha do Mel ( $152 \text{ km}^2$ ) a principal entrada ao sistema. Possui profundidade média de 5,4m, um volume total de água de  $14 \times 10^9 \text{ m}^3$  e um tempo de residência de 3,49 dias. O range médio da maré é de  $\sim 2,0 \text{ m}$ , com um prisma de maré de  $\sim 1,3 \text{ km}^3$  e intrusão da maré de  $\sim 12,6 \text{ km}$ . As maiores velocidades de correntes atingem médias de  $0,8\text{-}0,85 \text{ ms}^{-1}$  na enchente e  $1\text{-}1,4 \text{ ms}^{-1}$  na vazante (NOERNBERG et al, 2004; MARONE et al, 2005).

Os principais rios que desaguam nas Baías de Paranaguá e Antonina (eixo leste-oeste do Complexo Estuarino de Paranaguá) são: Cachoeira, Cacatú, Faisqueira, Nhundiaquara, Guaraguaçu e Sagrado. O rio Cachoeira é caracterizado como a maior fonte de água doce e de material particulado em suspensão (MPS)

para o estuário, especialmente no período de inverno. Segundo MANTOVANELLI (1999) nos anos de 1997 e 1998 o rio Cachoeira e o rio Nhundiaquara somaram 82% do aporte total de água doce no sistema estuarino, sendo que o rio Cachoeira contribuiu com 88% da carga de *MPS*. O rio Cachoeira sofreu uma transposição do rio Capivarí, da bacia do Ribeira do Iguape, para suas águas, resultando na formação da represa Capivarí-Cachoeira, localizada no alto da Serra do Mar, onde cerca de 900 m<sup>3</sup> de água chegam ao sopé da Serra por tubulações subterrâneas (15,4 Km de tubos que atravessam a Serra do Mar) e são turbinadas através da Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza, situada no município de Antonina. Esta transposição fez com que o volume de água do rio cachoeira dobrasse, modificando assim o transporte de materiais carregados por este rio (ROSA, 2010).

O CEP é apontado como um dos sistemas mais produtivos do mundo (MANN, 1982) e abriga um complexo de Unidades de Conservação estaduais e federais, destacando-se: Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba (APA), Estação Ecológica de Guaraqueçaba, Área de Relevante Interesse Ecológico das Ilhas do Pinheiro e Pinheirinho, Parque Nacional de Superagüi, Área de Especial Interesse Turístico do Marumbi e Estação Ecológica Ilha do Mel. A importância ecológica do CEP é determinada ainda pela sua grande diversidade de ambientes, incluindo planícies de maré, baixios, praias arenosas, ilhas, costões rochosos, marismas, rios de marés (gamboas) e manguezais (LANA et al, 2001).

Além de sua relevância ecológica, o CEP destaca-se ainda por possuir um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social do estado do Paraná, devido às atividades portuárias (Portos de Paranaguá e de Antonina, sendo o Porto de Paranaguá o primeiro em exportação de grãos na América Latina), atividade pesqueira e atividade turística. Estas atividades ocasionam um intenso tráfego de navios de grande porte (atividade portuária) e de pequenas e médias embarcações

(de passageiros, pesca ou lazer), resultando em um risco de contaminação da água das baías por petróleo e seus derivados.

## 2.2. DESENHO AMOSTRAL

O estudo foi realizado em 12 pontos no sub estuário de Antonina (Figura 1). Os pontos numerados correspondem aos locais de medições com CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) Castway, que foram escolhidos considerando o eixo longitudinal do canal de navegação. A linha indica, aproximadamente, a localização do transecto percorrido nas medições com ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). A localização desse transecto foi escolhida em função da constrição do canal estuarino, que intensifica as correntes de maré. No ponto 5, o mais profundo, também foi fundeado um marégrafo para aquisição dos dados de altura de maré ao longo de todo o período de amostragem. Para facilitar a interpretação dos resultados, os pontos de 1 a 4 são a montante do transecto, os pontos 6 a 10 são a jusante e os pontos 5, 11 e 12 compreendem o próprio transecto de perfilagem do ADCP.

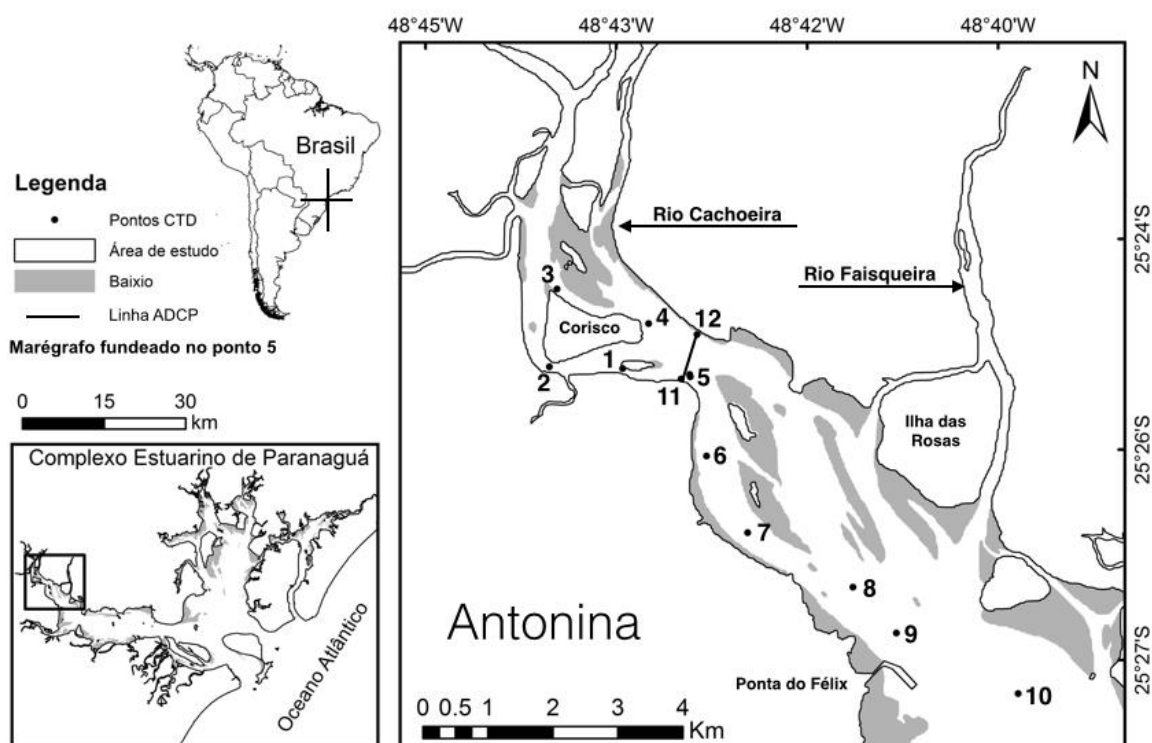


FIGURA 1. MAPA DA ÁREA DE ESTUDO INDICANDO OS PONTOS DE COLETA COM CTD E A LOCALIZAÇÃO DOS TRANSECTOS REALIZADOS COM ADCP

## 2.2 PROCEDIMENTOS AMOSTRAIS

Uma coleta piloto, com um ecobatímetro de alta resolução (200KHz e 456KHz) foi realizada para identificar os pontos na parte navegável do canal. Esse procedimento justificou a escolha da malha amostral e viabilizou uma navegação eficiente e segura, já que nesta região do sub estuário existem vários baixios e rochas submersas a poucos centímetros da linha d'água especialmente no estofo de vazante.

As campanhas de coleta de dados físicos foram realizadas nos dias 02 e 03 de junho de 2015 no sub estuário de Antonina durante um período de 13 horas para cada dia, intervalo correspondente a um ciclo completo de maré de sizígia.

Para aquisição de dados de temperatura, profundidade e salinidade nos 12 pontos, durante os dois dias de campanha, foi utilizado um CTD modelo *castway*

(*Soundtrack*), utilizado seguindo os protocolos do manual de utilização fornecido pela fábrica. Durante a primeira perfilagem em cada ponto, foram marcadas as coordenadas geográficas e uma âncora presa a uma bóia de arrinque foi usada para facilitar a localização do ponto. Foram realizadas perfilagens a cada duas horas em todos os pontos, exceto no ponto 5, onde a amostragem foi realizada a cada hora, e no ponto 11, que devido a falha de manuseio, só foram obtidos dois perfis no segundo dia de amostragem.

A aquisição de dados correntográficos (direção e intensidade de corrente) foi utilizado um foi feita com o equipamento ADCP marca SonTek modelo Argonaut, configurado para trabalhar com frequência de 1000 KHz através de três emissores equidistantes 120° entre si, voltado para baixo, com bússola interna do equipamento devidamente ligada e calibrada. O ADCP foi fixo mediante utilização de frame específico para o mesmo, na embarcação *Stratus*, submerso 20 cm da linha da água. Foram realizados 178 transectos, entre os pontos 11 e 12, durante os dois dias da campanha, aproximadamente 6 transectos por hora, procedimento este utilizado para obtenção da maior quantidade de dados válidos possíveis.

Para aquisição de dados de maré por variação de pressão, foi utilizado um CTD marca Sea-Bird Electronics, Inc. modelo SBE 37-SM MicroCAT (Conductivity and Temperature Recorder with RS-232 Interface),( [www.seabird.com/sbe37](http://www.seabird.com/sbe37)) fundeado no ponto mais profundo (ponto 5) do canal e devidamente sinalizado com uma boia de arrinque, das 8:30 h as 21:00 h no dia 02/06/2015, e das 8:15 h as 21:15 h no dia 03/06/2015, configurado para um intervalo de amostragem de 900 segundos (uma amostra a cada 15 minutos ). Este equipamento ainda propiciou a aquisição de dados de salinidade e temperatura no ponto em que esteve fundeado. Além dos dados do marégrafo próprio, foram obtidos os registros do marégrafo permanente localizado na Ponta do Félix, próximo a Antonina, na região costeira adjacente, aproximadamente, ao ponto 9.

Para os procedimentos de coleta de dados deste experimento, foram utilizadas três embarcações descritas a seguir:

1) Embarcação Arauna - construída em fibra de vidro com 7 metros de comprimento, 2 metros de boca com calado de 50 cm, com motor de explosão a gasolina de 60 hp, que permaneceu fundeada durante a coleta junto ao ponto 5, como embarcação de apoio e reserva no caso de quebra ou falha das demais envolvidas na logística.

2) Embarcação Stratus - construída em fibra de vidro com 7 metros de comprimento, 2 metros de boca com calado de 50 cm, com motor de explosão a gasolina de 60 hp, adaptada com targa construída em aço inox, devidamente preparada para fixação de suporte para ADCP, embarcação esta que trabalhou durante as 26 horas nos dois dias de coleta, no transsecto entre os pontos 11 passando pelo ponto 5 e 12.

3) Embarcação Casca de Jaca - construída em fibra de vidro com 5,8 metros de comprimento, 2,6 metros de boca com calado de 40 cm, com motor de explosão a gasolina de 115 hp, contendo GPS e ecobatímetro marca GARMIN modelo EchoMAP 73 dv (com precisão de 2 metros, conforme informação do fabricante), que foi utilizada para marcação e identificação de coordenadas geográficas e perfilagem com CTD CastAway nos 12 pontos nos dois dias de coleta de dados.

## 2.3 ANÁLISE DOS DADOS

Em laboratório, com o auxílio do software Excel, os dados foram planilhados e posteriormente utilizando o software *Surfer*, foram confeccionados diagramas *Hovmoller* de salinidade, temperatura e densidade, para todos os pontos dos dois dias de coleta. Para melhor compreensão e visualização destes gráficos, durante o



processo de confecção dos mesmos, foi utilizado a adimensionalização das profundidades (de 0 a -1), já que os perfis foram sempre nos mesmos pontos.

Os dados do ADCP foram processados e analisados através do software ViewADCP. Para identificar e quantificar as velocidades de enchente e vazante durante o ciclo de maré, os vetores de velocidade foram decompostos para utilização apenas das componentes longitudinais, efetuando-se uma rotação de 30° no sentido horário do eixo de navegação da embarcação, em relação ao eixo longitudinal do canal, para correta compreensão e visualização das velocidades longitudinais. De posse destas velocidades, e utilizando software *Surfer* foram confeccionados diagramas de *Hovmoller* de velocidades longitudinais para cada dia de coleta, no ponto 5 integradas as perfilagens de CTD. No software ADCP View, foram confeccionados gráficos de velocidades e suas respectivas intensidades e direção para os dois dias de coleta, aproximadamente um gráfico a cada hora durante todo ciclo de maré, contemplando os períodos de vazante; estofo de vazante; enchente; estofo de enchente e vazante novamente.

Os dados de maré foram planilhados e tratados com o software Excel para confecção da respectiva curva de maré.

A interpretação dos diagramas de *Hovmoller* foram utilizados para classificar o sub-estuário de Antonia de acordo com o método apresentado por OFFICER (1983), que analisa somente a estratificação vertical da salinidade na coluna de água. Conforme Miranda et al. (2002) por este método as classes de estuário podem ser divididas em:

- Cunha salina: há uma interface distinta entre a água da descarga fluvial e a água do mar, com um fluxo de água pouco salino da camada superficial, indicando que o entranhamento é o processo predominante.
- Altamente estratificado: a salinidade apresenta uma acentuada estratificação vertical e a diferença entre a salinidade do fundo e da superfície é de várias unidades.

- Parcialmente estratificado: a estratificação de salinidade é moderada e a diferença entre as salinidades do fundo e da superfície é de poucas unidades.

- Bem misturado: quando não há praticamente diferença entre a salinidade da superfície e do fundo, caracterizando a ausência da haloclina.

Os dados das séries temporais das variáveis climáticas foram obtidos no site do INMET (Paranaguá) e serviram para contextualização do clima antes e durante do período de amostragem.

### **3 RESULTADOS**

Para a compreensão da hidrodinâmica da área de estudo a apresentação dos resultados foi separada através da posição geográfica dos pontos amostrais e dos parâmetros termohalinos. A análise das curvas de maré permitiu o entendimento da dispersão espaço-temporal da altura de maré amostrada com a altura de maré medida no marégrafo da Ponta do Felix (Figura 3).

Os valores de temperatura, salinidade e densidade referentes às amostragens do CTD foram integrados para três regiões do sub estuário de Antonina, e separados para cada dia de amostragem, dias 02/06 e 03/06. Os pontos amostrais 1, 2, 3, 4 foram agrupados por estarem a montante do estreitamento do sub estuário. Os pontos 5, 11 e 12 estão posicionados exatamente sobre o estreitamento. Os pontos 6, 7, 8, 9 e 10 foram agrupados por apresentarem suas posições a jusante do estreitamento (Figura 2).

Os campos de velocidade longitudinal amostrados através do levantamento hidrográfico com o equipamento ADCP foi usado para extração do perfil de velocidade longitudinal no ponto 5 e para os campos de velocidade longitudinais juntamente com a altura de maré, contemplando toda a área de vazão do canal.

### 3.1 DADOS INMET

Os dados pluviométricos indicam que houve pouca precipitação do período da coleta, conforme mostrado em vermelho na figura 2.

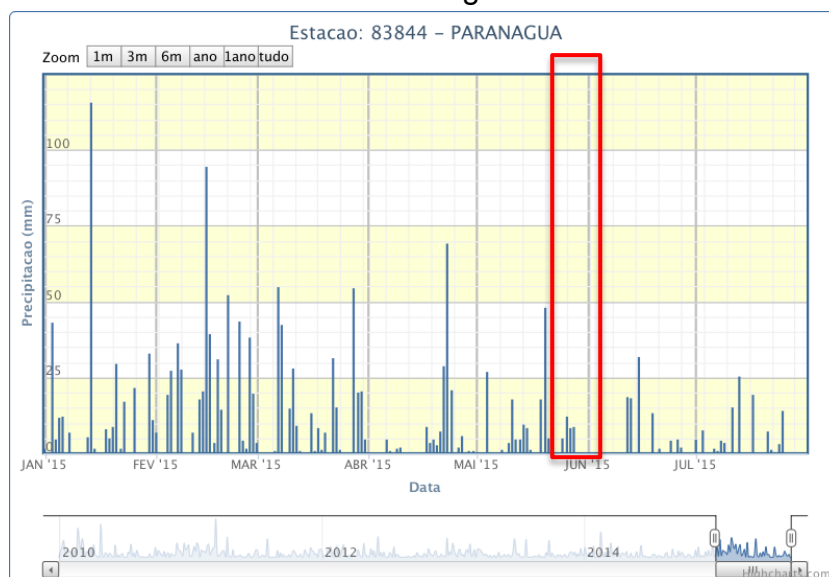


FIGURA 2. DADOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DE PARANAGUÁ - INMET.

### 3.2 VARIAÇÃO DA MARÉ

Ao compararmos os dados obtidos nas duas estações, observou-se uma defasagem no tempo para a altura de maré registrada entre o marégrafo do Félix e o CTD fundeado no transecto. Esta diferença no tempo apresentada na Figura 3 indica aproximadamente um atraso de 1 hora entre os dois marégrafos, distantes cerca de 9 km entre eles. Isto significa que a onda de maré sofre um atraso para adentrar no sub-estuário de Antonina. A partir desta informação pode-se inferir que para este caso não poderá ser realizado o Diagrama de Hansey e Ratray para a classificação do sub estuário de Antonina, já que esta análise tem como pré-requisito a evolução da onda de maré, e suas correntes, de forma estacionária.

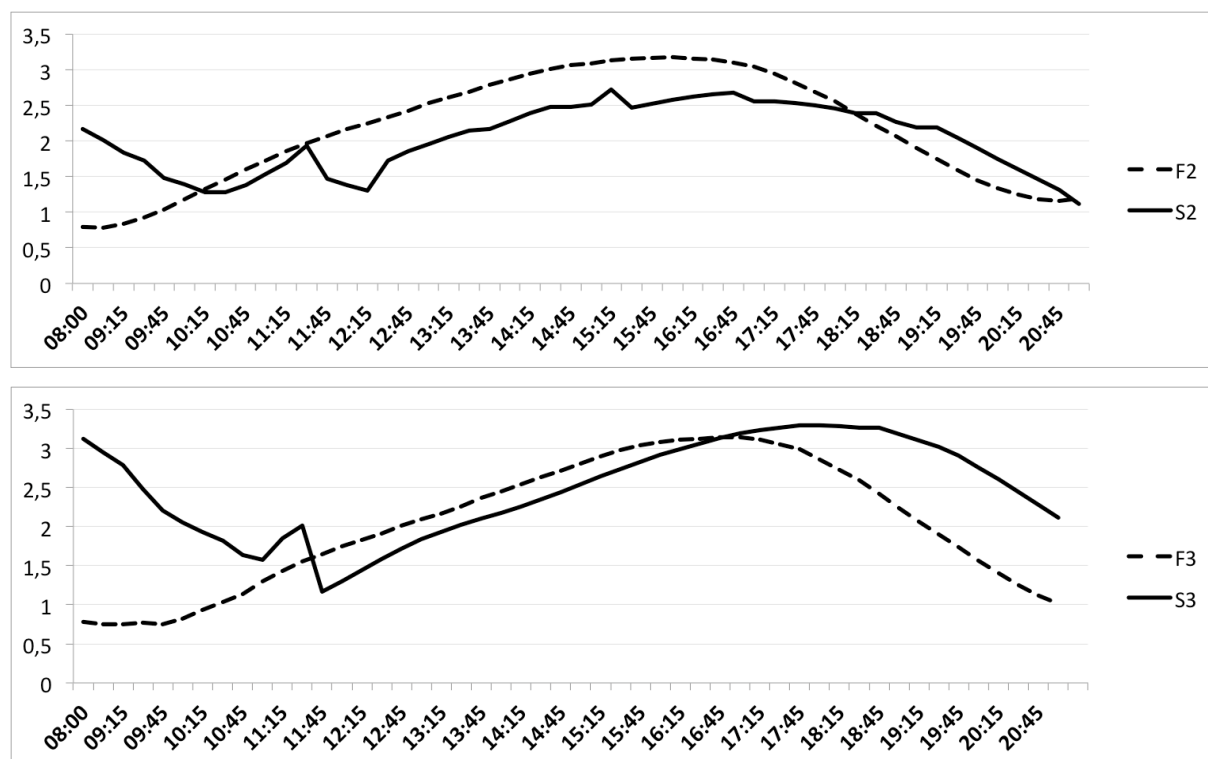


FIGURA 2. VARIAÇÃO DA ALTURA DE MARÉ MEDIDAS PELO CTD SEABIRD (S) E PELO MARÉGRAFO DO FÉLIX (F), NOS DIAS 02/06/15 (A) E 03/06/15 (B).

### 3.3 DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA SALINIDADE, DENSIDADE E TEMPERATURA

Foi possível observar a variação espaço temporal da salinidade nos dias 02/06/15 (Figura 4) e 03/06/15 (Figura 5). A salinidade variou de aproximadamente 1 a 20 nos perfis a montante do transecto e de 10 a 24 nos perfis a jusante. Como já esperado, as salinidades mais baixas ocorreram no estofo da vazante e as mais altas no estofo da enchente. Foi possível observar o comportamento da cunha salina, com águas mais densas, salinas no fundo, adentrando o canal estuarino durante a maré de enchente.

Houve pouca variação das velocidades de corrente na coluna d'água. Em alguns casos as velocidades foram maiores na superfície do que no fundo. De

qualquer maneira, as velocidades de vazante (vermelho) foram maiores que as de enchente (azul) (Figuras 6 e 7).

A partir da análise dos pontos do transecto, pode-se afirmar que existe estratificação lateral nos parâmetros termohalinos. Outro padrão observado foi que quanto mais distante do transecto, tanto a montante quanto a jusante, a coluna d'água tende a ficar mais homogênea, ou seja, quanto mais próximo do estreitamento do canal, mais estratificada é a coluna d'água.

O mesmo padrão foi observado para a densidade (Figuras 4 - dia 02/03/15; Figuras 5 - dia 03/06/15), porém para a temperatura (Figuras 4 - dia 02/03/15; Figuras 5 - dia 03/06/15) a coluna d'água se manteve mais homogênea, com variações horizontais maiores que verticais, parcialmente misturados. Apesar de não ser observada a estratificação da temperatura na coluna d'água, ela aumentou ao longo da enchente e em direção à montante do estuário.

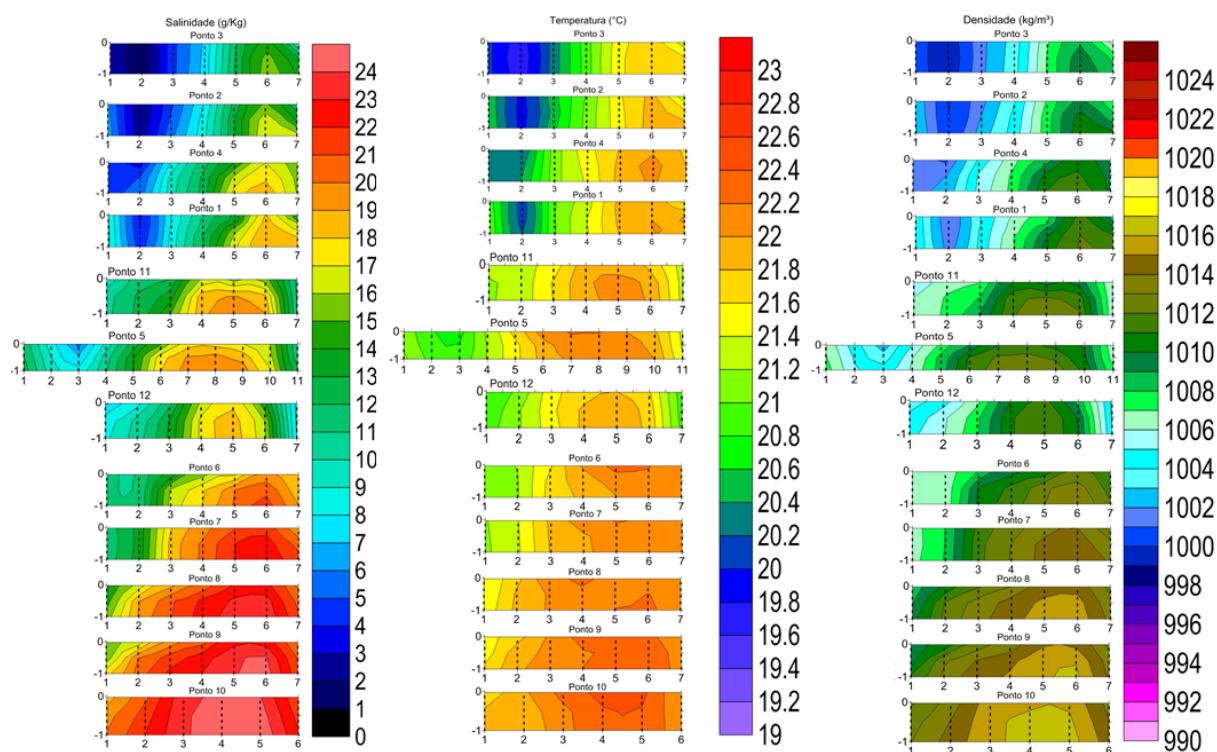


FIGURA 4. VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA SALINIDADE, DENSIDADE E TEMPERATURA NO DIA 02/06/15

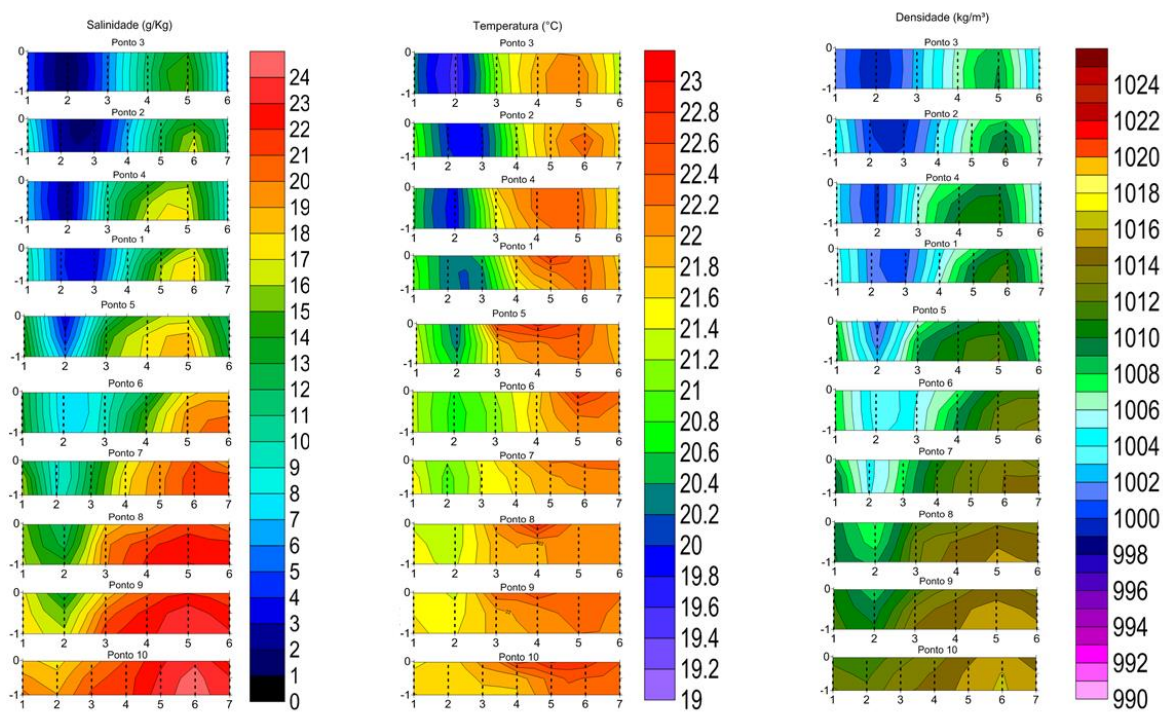


FIGURA 5. VARIAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA SALINIDADE, DENSIDADE E TEMPERATURA NO DIA 03/06/15

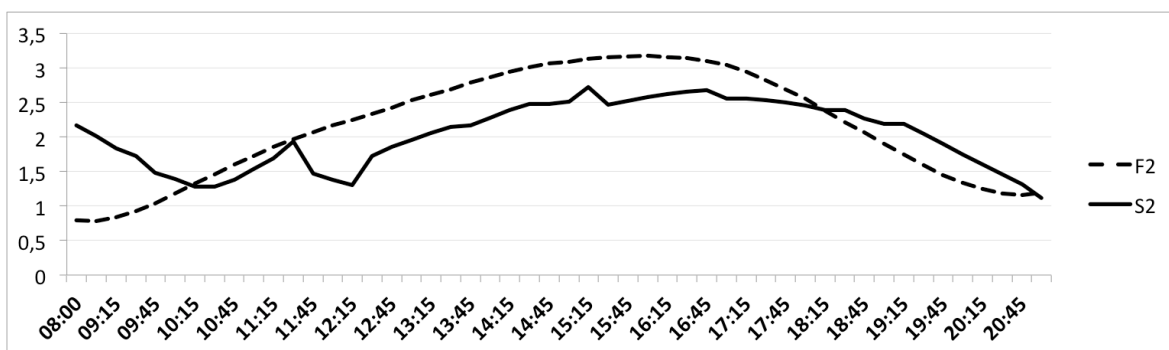
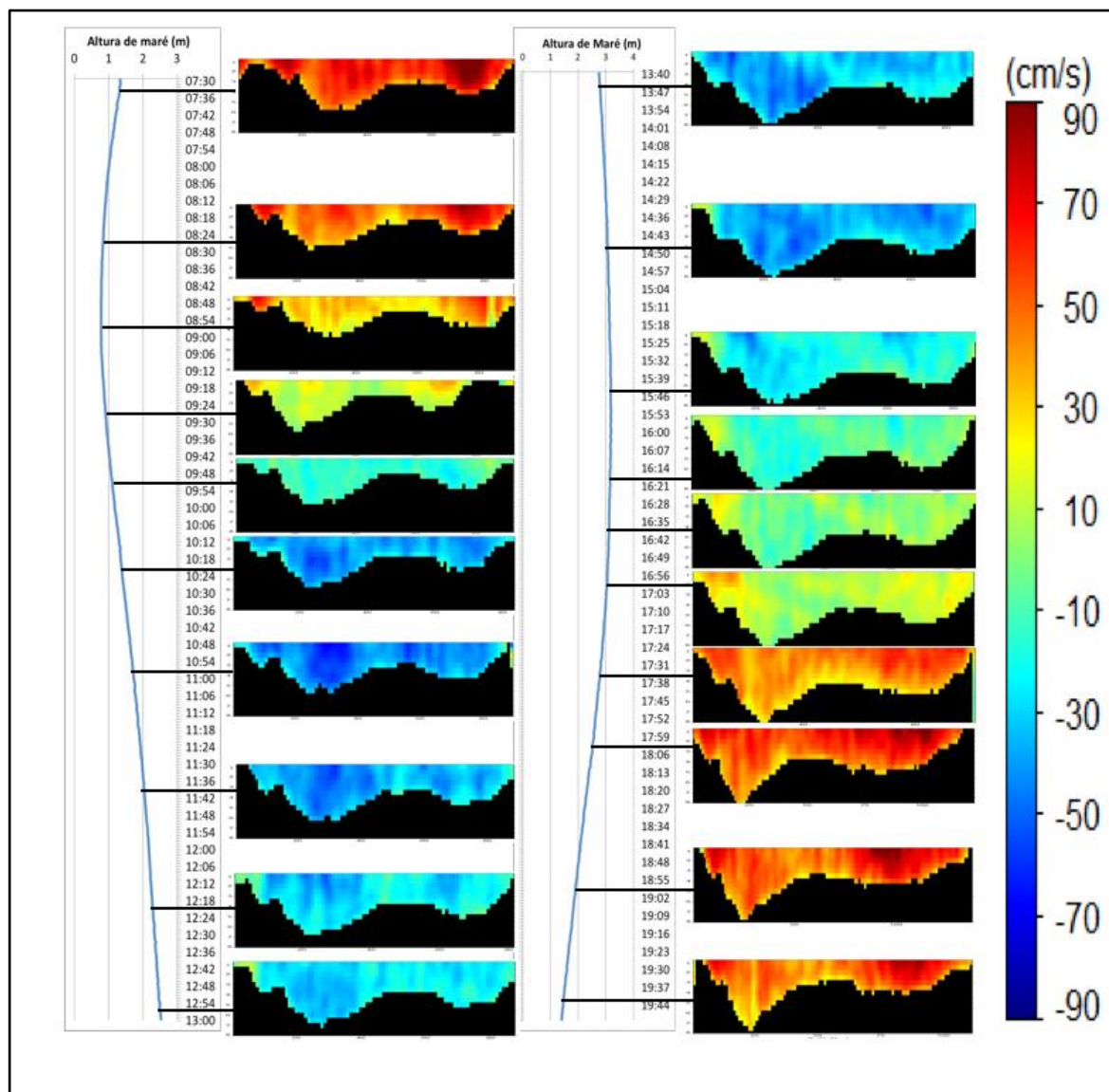


FIGURA 6. VELOCIDADE LONGITUDINAL DA CORRENTE AO LONGO DO TEMPO NO DIA 02/06/2015.



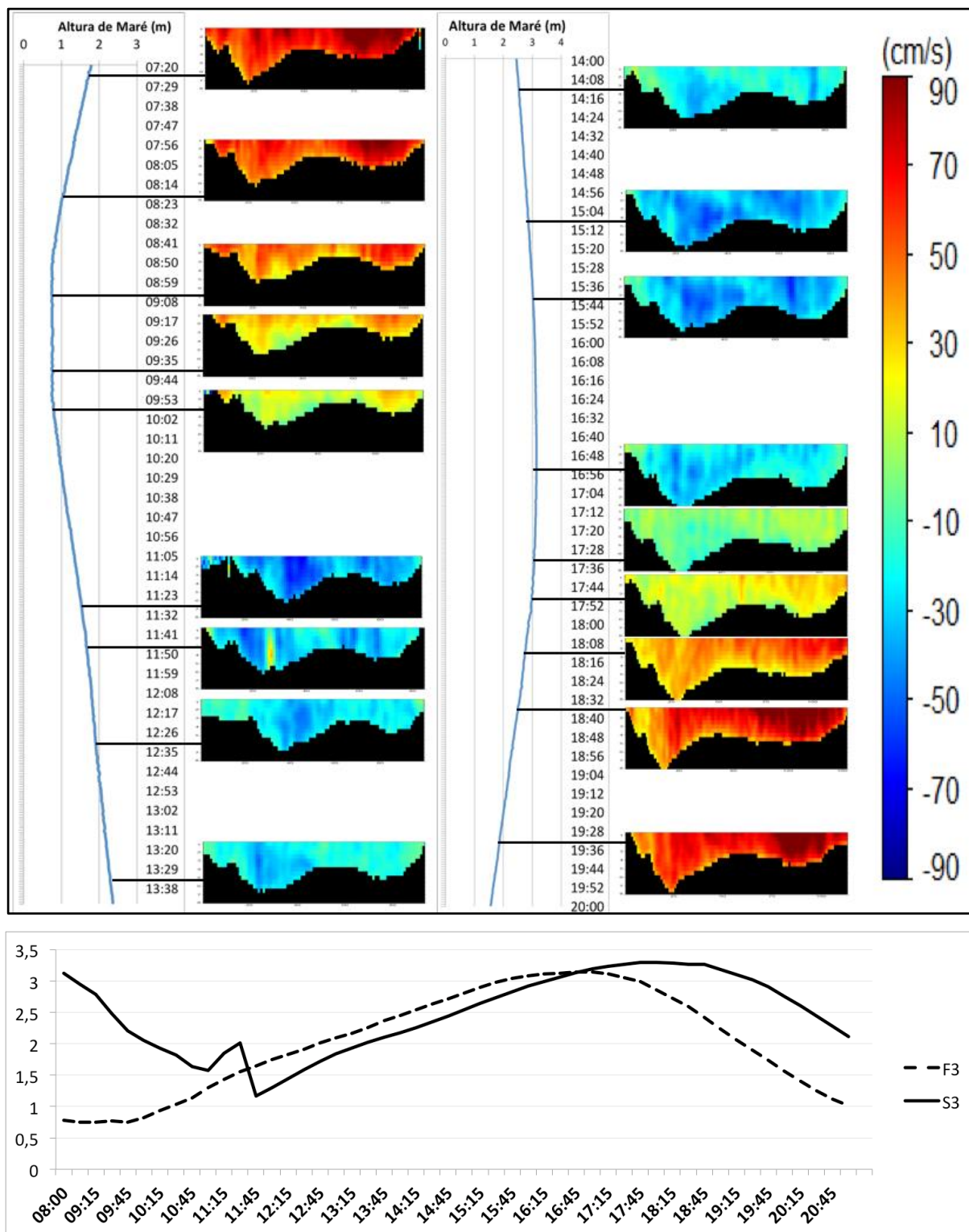


FIGURA 7. VELOCIDADE LONGITUDINAL DA CORRENTE AO LONGO DO TEMPO NO DIA 03/06/2015.



## 4 DISCUSSÃO

Segundo os critérios apresentados por OFFICER (1983) classificou-se o sub estuário de Antonina como sendo parcialmente misturado nos pontos de uma seção transversal localizada na desembocadura deste, sendo que a diferença entre a salinidade média da superfície e fundo, num ciclo maré, foi menor do que 3 ppm, ou seja, a estratificação de salinidade é moderada e a diferença entre as salinidades do fundo e da superfície é de poucas unidades (MIRANDA et al. 2002).

Devemos esperar que, em condições de maior regime pluviométrico, a estratificação vertical da salinidade na coluna de água se intensifique e provoque alterações nos padrões de circulação e na estabilidade da coluna de água, uma vez que a chegada de água doce no sistema se intensificaria, assim como o gradiente longitudinal de salinidade entre a cabeceira e a desembocadura do sistema. Conforme apresentado na figura 2, no período antes e durante as coletas não ocorreram chuvas significativas

O comportamento hidrodinâmico ao longo do transecto mostrou que existe diferença nas intensidades das correntes entre os canais principal (mais profundo) e secundário (mais raso). Durante os momentos da vazante, as velocidades mais intensas foram registradas no canal mais raso, nos dois dias de amostragem. Já nos períodos de enchente as velocidades mais intensas foram registradas no canal principal. Este padrão coincide com a evolução espaço-temporal dos parâmetros termohalinos e por não apresentar um modelo bidimensional estacionário, lateralmente homogêneo e com seção retangular, os dados não podem ser utilizados para a caracterização do sub estuário de Antonina segundo os parâmetros utilizados na classificação de HANSEY e RATRAY (HANSEN & RATRAY, 1966; IBÁÑEZ ET AL., 1997). Nos momentos de enchente, próximos ao estófo da maré cheia, foram registradas velocidades positivas (de vazante) próximo a margem do

canal principal. É possível que esta característica observada seja ocasionada pelo fluxo fluvial advindo do canal ao sul da Ilha do Corisco, onde foram posicionados os pontos amostrais 1 e 2.

Apesar dos resultados apresentados neste trabalho serem bastantes específicos no que diz respeito ao momento da coleta, indicando uma situação de maré de sizígia, no final de outono, sem precipitação, os valores mostram uma primeira visualização de alguns processos físicos que ocorrem no sub estuário de Antonina, e que podem ajudar futuros trabalhos físicos, químicos, biológicos e geológicos na região. Esses resultados são similares aos já encontrados em outros estuários e sub-estuários do CEP (NOERNBERG et al, 2004; MARONE et al, 2005)

## **5 CONCLUSÃO**

Para caracterizar a dinâmica hídrica do sub estuário de Antonina, os processos e métodos utilizados neste trabalho apresentaram-se viáveis e coerentes. Desde o planejamento amostral e operacional durante um ciclo de maré de sizígia para a aquisição dos parâmetros hidrodinâmicos, até a análise da variação espaço-temporal destes, os métodos se mostraram efetivos para caracterizar a dinâmica do sub estuário naquele período.

Os maiores valores de estratificação estiveram associados aos momentos de estofo da maré vazante, sob baixas velocidades médias na coluna d'água. Nestes momentos, a diferença de densidade entre as camadas superficiais e as camadas de fundo, foi suficiente para gerar estratificação vertical, em oposição à mistura turbulenta provocada pelo cisalhamento de velocidade. Com isto, e segundo os critérios de OFFICER (1983) classificou-se o sub estuário de Antonina como sendo parcialmente misturado na seção transversal localizada na desembocadura.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁVILA, R. A. 2013. Distribuição do material particulado em suspensão e suas inter-relações com diferentes propriedades no estuário da Lagoa dos Patos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande. Instituto de Oceanografia - RS. 91p.

DYER, K. 1997. Estuaries: a physical introduction. John Wiley & Sons, Sydney, 140 p.

HANSEN, D. V. & RATRAY Jr., M. 1966. New dimension in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.*, 11(3):319-325.

IBAÑEZ, C.; PONT, D. & PRAT, N. (1997). Characterisation of the Ebre and Rhone Estuaries. *Limnol. and Oceanogr.*, 42 (1) 89- 101.

KJERFVE, B.; WOLAVER, T. G. 1988. Sampling optimization for studies of tidal transport in estuaries. American Fisheries Society Symposium, Estados Unidos, v. 3. P: 26-33.

KJERFVE, B. 1990. Manual investigation of hydrological processes in mangrove ecosystems. Nova Delhi, UNESCO/UNDP, 79 p.

LANA, P. C., E. MARONE, R. M. LOPES AND E. C. MACHADO. 2001. The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: Seelinger U, Kjerfve B (eds.). Coastal marine ecosystems of Latin America. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. Ecological Studies 144, 131-145. doi: 10.1007/978-3-662-04482-7\_11

MANTOVANELLI, A. 1999. Caracterização da Dinâmica Hídrica e do Material Particulado em Suspensão na Baía de Paranaguá e em sua Bacia de Drenagem. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. 169p.

MANTOVANELLI, A., E. MARONE, E. T. SILVA, L. F. LAUTERT, M. S. KLINGENFUSS, V. P. PRATA JR, M. A. NOERNBERG, B. A. KNOPPERS AND R. J. ANGULO. 2004. Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. *Estuar Coast Shelf S* 59(4), 523 – 537. doi: 10.1016/j.ecss.2003.09.001

MARONE, E. AND D. JAMIYANAA. 1997. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. *Nerítica* 11, 95-107.

MARONE, E., E. C. MACHADO, R. M. LOPES AND E. T. SILVA. 2005. Land-ocean fluxes in the Paranaguá Estuarine System Southern Brazil. *Braz J Oceanogr* 53(3/4), 169-181. doi: 10.1590/S1679-87592005000200007

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. & KJERFVE, B. 2002. *Princípios de oceanografia física de estuários*. São Paulo, EDUSP. 424 p.

NOERNBERG, M.A., LAUTERT, L. F. C., ARAUJO, A. D, MARONE, E., ANGELOTTI, R., NETTO JR., J. P. B., KRUG, L. A. 2004. Remote Sensing and Gis Integration for Modelling the Paranagua Estuarine Complex – Brazil. *Journal of Coastal Research*. Special Issue 39.

OFFICER C. B. 1987. Physics os estuarine circulation. In: *Estuaries and enclosed seas (Ecosystems of the World)*. Ketchum, B. H. (ed.), Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. P:1:-14.

PAULA E. V. & CUNICO C. 2007. O assoreamento das baías de Antonina e de Paranaguá e a gestão de suas bacias hidrográficas. In: *Dragagens Portuárias no Brasil*. Antonina, Paraná. Cap. 3, p. 144 – 154.

ROSA, R. 2010. Fluxos de nutrientes e material particulado na bacia de drenagem do Complexo Estuarino de Paranaguá – PR. *Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) Universidade Federal do Paraná*. 103p

## 7 ANEXOS

### 1 - TABELA DE COORDENADAS GEOGRÁFICAS

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Latitude	-25.4156	-25.4149	-25.4041	-25.4087	-25.416	-25.4269	-25.4374	-25.4447	-25.451	-25.4591	-25.4163	-25.4101
Longitude	-48.7087	-48.7302	-48.7292	-48.7151	-48.7086	-48.706	-48.6995	-48.6832	-48.6765	-48.6577	-48.71	-48.7077